

Introdução

Com a invenção da válvula tríodo em 1907, por L. de Forest, estava inaugurada a era da eletrônica. Aperfeiçoando a válvula díodo, inventada por Fleming poucos anos antes, Forest construiu o primeiro dispositivo eletrônico capaz de amplificar tensões elétricas.

Emissão Termoiônica

A emissão termoiônica é um fenômeno detectável em qualquer superfície metálica suficientemente aquecida. Vamos analisar a figura 1, que contém duas placas metálicas, denominadas (p) e (k), encerradas em um invólucro onde existe vácuo, uma fonte de tensão (V_b) e um miliamperímetro (A). Se a placa metálica (k), que chamaremos de cátodo, for suficientemente aquecida, passará a emitir uma grande quantidade de elétrons, produzindo uma determinada corrente elétrica que será indicada pelo amperímetro. Assim, os elétrons que partem do cátodo encontram o campo elétrico produzido pela placa (p), que chamaremos de ânodo, carregada positivamente, e logo são acelerados em direção a ela.

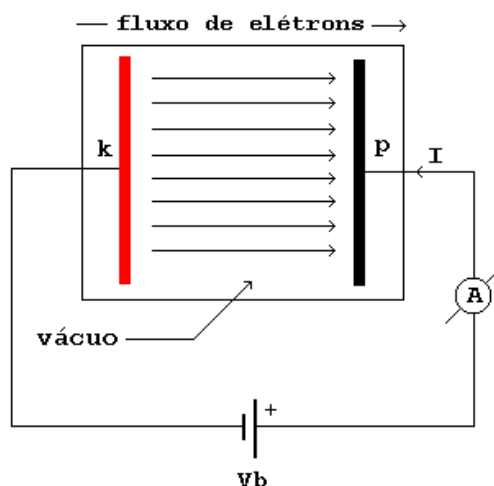


Figura 1

A corrente que pode ser emitida por unidade de superfície do cátodo depende fundamentalmente da temperatura de operação e da função de trabalho do material empregado na construção do mesmo. Alcançado o valor mínimo de energia térmica aplicada ao cátodo, valor este determinado pela função de trabalho do material empregado, a emissão termoiônica inicia e aumenta rapidamente com o aumento da temperatura. A emissão termoiônica normalmente não ocorre, ou ocorre com baixa eficiência, à pressão atmosférica normal. Por este motivo, as válvulas eletrônicas são montadas dentro de um invólucro, geralmente de vidro, onde existe alto vácuo.

A corrente que circula entre (k) e (p) pode ser limitada de duas formas:

1. Se (V_b) for suficientemente elevada para impedir que os elétrons emitidos pelo cátodo estacionem no espaço intereletródico, a corrente (I) é limitada pela temperatura;
2. Quando uma certa quantidade de elétrons emitidos pelo cátodo não passam instantaneamente para o ânodo, estabelece-se uma carga espacial no espaço intereletródico da válvula. Desta forma, a corrente (I) é limitada pela carga espacial.

Nas aplicações práticas com válvulas eletrônicas, o cátodo é mantido a uma temperatura bastante elevada, em torno de 1000 graus °C. Como nem todos os elétrons passam instantaneamente para o ânodo, pois é necessário um tempo finito de trânsito entre (k) e (p), haverá sempre uma carga espacial em torno de (k).

A Válvula Díodo

A válvula díodo é a mais simples das válvulas eletrônicas, pois contém apenas dois eletrodos. Embora tenha uma infinidade de aplicações, é usada basicamente como retificadora em fontes de alimentação. A denominação "válvula", provem da característica fundamental do díodo, que é permitir a circulação de corrente somente em um sentido, atuando como um interruptor.

As válvulas têm um tempo de aquecimento de alguns minutos, tempo este necessário para que o filamento aqueça o cátodo e a emissão termoiônica inicie. Se utilizarmos díodos semicondutores na fonte de alimentação a alta-tensão aparece nas placas das válvulas instantaneamente, estando o cátodo ainda frio e, portanto, sem condições de estabelecer um fluxo elétrico para a placa. Por outro lado, se utilizarmos válvulas retificadoras a alta-tensão só surgirá nas placas das válvulas quando a própria retificadora atingir um nível de aquecimento suficiente. Existe, desta forma, um equilíbrio entre o aquecimento das válvulas e alta-tensão nas placas. Em outras palavras, a alta-tensão de placa só atinge seu valor nominal quando o cátodo estiver suficientemente aquecido. A expectativa de vida útil de uma válvula aumenta consideravelmente quando usamos válvulas retificadoras no lugar de díodos semicondutores nas fontes de alimentação.

Tomando por base o que foi exposto em Emissão Termoiônica, podemos compreender como o díodo a vácuo funciona.

Inicialmente, vamos nos familiarizar com a simbologia do díodo e seus aspectos construtivos básicos. A figura 2 mostra os símbolos empregados em diagramas e circuitos e a correspondente estrutura física interna.

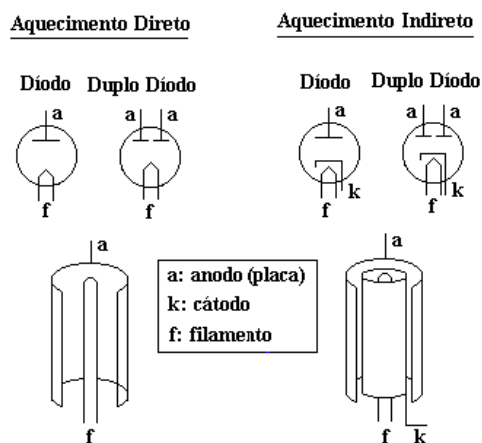


Figura 2

Os díodos de aquecimento direto utilizam o filamento como eletrodo negativo, o cátodo, enquanto os de aquecimento indireto tem uma estrutura separada para o cátodo. O funcionamento de díodos de aquecimento direto é idêntico ao de aquecimento indireto, sendo que os díodos de aquecimento direto têm uma vida útil sensivelmente inferior em função do desgaste prematuro do filamento e, conseqüentemente, do cátodo, fazendo com que a válvula perca eficiência de emissão. O mercado atual de válvulas eletrônicas oferece ambos os tipos de díodos. Os díodos de aquecimento direto duplo, denominados duplo-díodo, (vide figura 2) são mais comuns e equipam a maioria dos amps comerciais, tanto aqueles que chamamos de "vantage amps" como os produzidos na atualidade.

Como já dissemos, a principal característica da válvula díodo é permitir o fluxo elétrico somente em um sentido. Observando a figura 3, verificamos que o fluxo elétrico só é detectável pelo miliamperímetro quando a placa está polarizada positivamente com relação ao cátodo. Quando a placa se torna negativa em relação ao cátodo o fluxo elétrico é imediatamente interrompido e a corrente circulante é, para todos os efeitos práticos, nula. Isto acontece porque, estando a placa negativa, não pode atrair os elétrons que deixam o cátodo, pois os mesmos tem carga negativa.

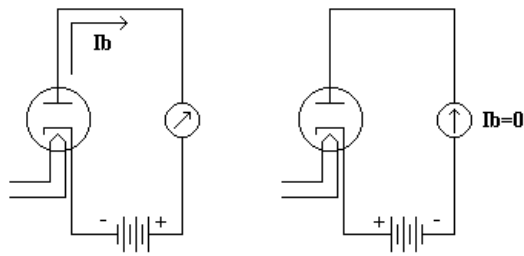


Figura 3

Avançando um pouco no estudo do díodo a vácuo, podemos verificar a relação entre a corrente de placa I_b e a tensão de placa E_b para uma tensão de filamento fixa. Para este propósito, é necessário montar e analisar o circuito básico apresentado na figura 4, formado por um díodo de aquecimento indireto, uma fonte de tensão E_{bb} , um miliamperímetro, um voltímetro e um reostato, necessário para prover valores de tensão variáveis para a placa.

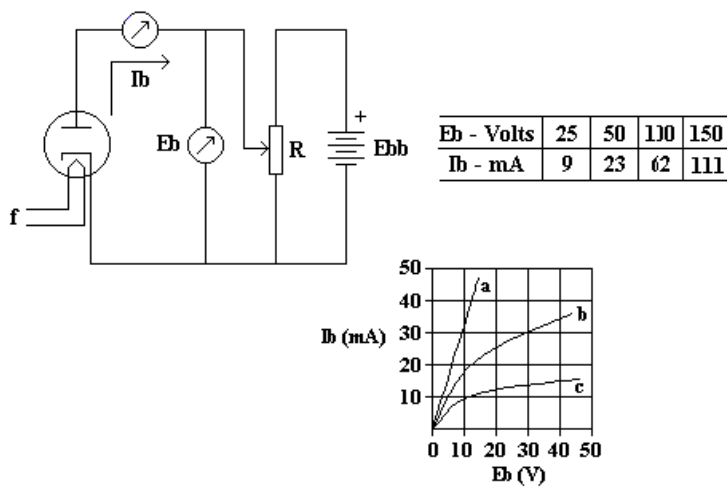


Figura 4

A tabela ao lado do circuito evidencia a influência do potencial positivo de placa na magnitude da corrente que circula entre cátodo e placa. A figura 4 inclui, ainda, um gráfico que demonstra a relação entre a corrente de placa I_b e a tensão de placa E_b para diversos valores da tensão de filamento. Este gráfico é denominado curva característica do díodo. Como temos mais de uma curva, denominamos, então, família de curvas características. Podemos observar que a corrente I_b , para uma determinada temperatura de cátodo, (ou filamento no caso de aquecimento direto), não aumenta proporcionalmente com o aumento da tensão de placa E_b , pois todos os elétrons emitidos são coletados pela placa. A partir deste ponto, qualquer acréscimo da tensão E_b não produz nenhum acréscimo na corrente I_b . As curvas (b) e (c) do gráfico em questão mostra como se comporta a relação I_b - E_b quando o cátodo é aquecido por tensões inferiores para as quais o díodo foi construído. A curva (a) indica a relação I_b - E_b do díodo, denotando que a corrente I_b aumenta expressivamente com o aumento de E_b . Como regra geral, a corrente de placa é proporcional a potência $3/2$ da tensão de placa. Desta forma, a relação I_b - E_b do díodo pode ser escrita da seguinte forma: $I_b = kE_b^{3/2}$. A constante k tem um valor numérico e é inteiramente dependente das dimensões e da geometria dos eletrodos.

Três observações quando se tratar de Fontes de Alimentação:

- 1) Salvo menção em contrário, todos os potenciais dos eletrodos da válvula são referenciados ao cátodo;
- 2) O fluxo de elétrons em uma válvula é do cátodo para a placa. No entanto, convencionou-se considerar este fluxo em termos de seu equivalente em cargas positivas. Assim, + I será da placa para o cátodo.
- 3) As simbologias de tensão e corrente para os diversos eletrodos das válvulas eletrônicas podem parecer um pouco curiosas e confusas, pois foram adotadas nos primórdios da eletrônica. Abaixo relacionamos as principais, inclusive para a válvula tríodo.

Tensão de placa: E_b ou V_a

Tensão de alimentação: E_{bb} ou V_b .

Tensão de polarização de grade de controle: E_{cc}

Tensão de grade de controle: E_c , E_g ou V_g

Tensão de filamento: E_f ou V_f

Corrente de placa: I_b ou I_a

O Tríodo Amplificador

A válvula tríodo, um dispositivo de três eletrodos, é o primeiro resultado do aperfeiçoamento do díodo à vácuo. A inclusão de um terceiro eletrodo, estrategicamente colocado entre o cátodo e a placa, constituiu o primeiro dispositivo eletrônico, em torno do qual pode ser implementado qualquer circuito eletrônico, seja um amplificador um oscilador ou um filtro.

Esse terceiro eletrodo é denominado grade ou, mais especificamente, grade de controle, cuja função é controlar a corrente que circula entre o cátodo e a placa. Sendo um eletrodo "aberto", a grade de controle, em princípio, não está incluída, sob o aspecto de corrente contínua, no circuito cátodo-placa. A grade de controle, salvo em aplicações especiais, é sempre polarizada negativamente em relação ao cátodo. A título de ilustração, a válvula tríodo se assemelha, em termos de princípio de operação, ao transistor de efeito de campo (FET).

A figura 5 apresenta a simbologia tradicional encontrada em diagramas esquemáticos e na literatura em geral para tríodos e duplo-tríodos, sendo este último nada mais que dois tríodos completamente independentes montados no mesmo invólucro. Em raríssimos casos o filamento é desenhado dentro do símbolo do tríodo. Geralmente são desenhados na fonte de alimentação com seus respectivos pinos.

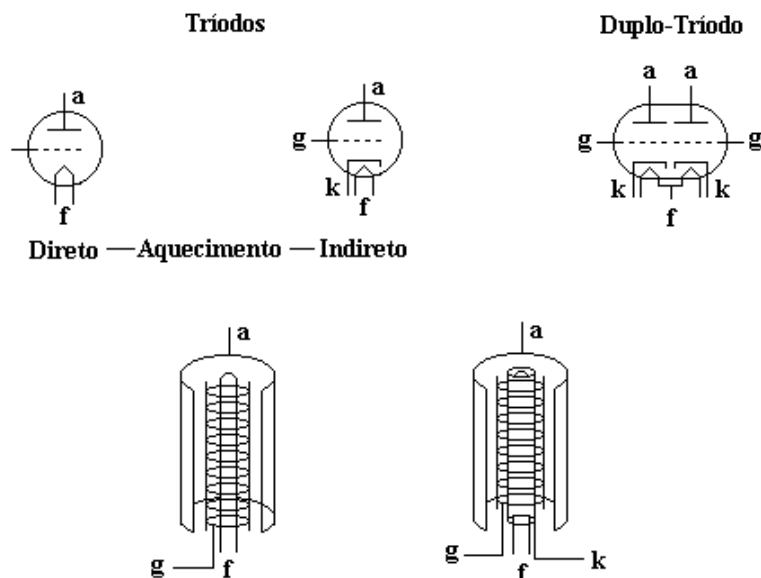


Figura 5

Os tríodos simples são, via de regra, tríodos de potência de aquecimento direto, capazes de entregar alguns watts a um alto-falante através de uma impedância adequada (transformador de saída). São usados principalmente em estágios de potência single-ended de amplificadores para alta-

fidelidade. O único tipo fabricado atualmente é a 2A3. Geralmente, tem tensão de filamento igual a 2,5V sob corrente contínua ou alternada. Os tríodos simples para aplicações gerais em áudio são de aquecimento indireto, tendo tensão de filamento igual a 6,3V sob corrente contínua ou alternada. Os duplo-tríodos representam a quase totalidade destes dispositivos fabricados atualmente. São válvulas miniaturas de 9 pinos e têm filamentos independentes com um ponto em comum. Portanto, podem ser ligados em paralelo a uma fonte de tensão de 6,3V ou em série a uma fonte de 12,6V, contínua ou alternada.

Vamos agora verificar como o tríodo se comporta sob o aspecto de corrente contínua, ou seja, admitindo que a grade de controle está polarizada por um potencial cc sem nenhuma corrente alternada.

A introdução da grade de controle inserida entre cátodo e placa permite o controle efetivo da corrente que circula entre estes eletrodos. É fácil constatar a eficiência deste controle quando admitimos que a grade está polarizada negativamente em relação ao cátodo. A figura 6 apresenta um circuito básico a tríodo com a grade polarizada com três valores de tensão negativa e um com tensão positiva e mantendo a tensão de placa fixa. Este circuito incorpora, agora, uma fonte de polarização negativa ajustável denominada Ecc. Nos circuitos práticos, a tensão de grade de controle E_c é obtida diretamente através de Ebb e não de Ecc. Na verdade, todas as tensões necessárias para polarizar os eletrodos de uma válvula são obtidas através de Ebb.

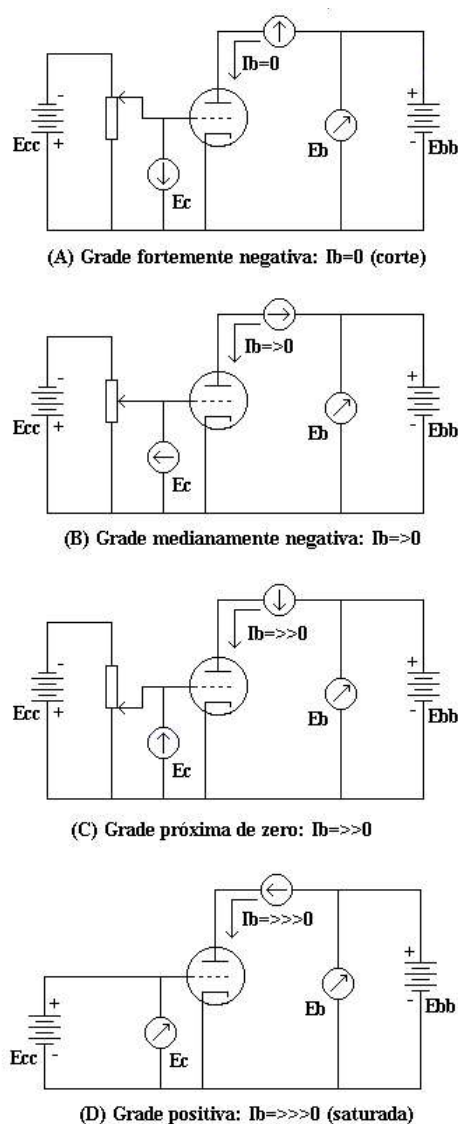


Figura 6

A figura 6 (A) mostra o tríodo com uma tensão de polarização de grade fortemente negativa. Quando isto ocorre, não circula nenhuma corrente no circuito cátodo-placa. Diz-se, então, que o tríodo está no ponto de corte. Isto é evidente, pois estando a grade muito negativa é de se esperar que todos, ou quase todos, os elétrons emitidos pelo cátodo sejam repelidos pela grade.

A figura 6 (B) mostra a grade de controle com uma tensão de polarização razoavelmente negativa. Nesta situação, o fluxo de corrente no circuito cátodo-placa é significativo.

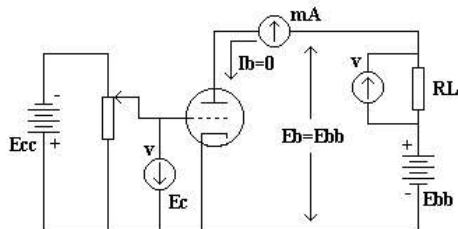
Na figura 6 (C) a tensão de negativa de polarização e grade é muito pequena, na verdade

próxima de zero, e o fluxo de elétrons no circuito cátodo-placa é muito intenso. Em uma situação como esta, o triodo está próximo do ponto de saturação.

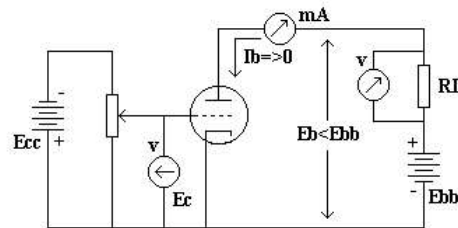
Na figura 6 (D), a grade está polarizada positivamente. Isto significa que todos os elétrons emitidos pelo cátodo são acelerados em direção à placa, não encontrando, neste percurso, nenhum elemento que limite o fluxo. Nesta situação, a grade de controle perde sua função primordial e, a partir deste ponto, um aumento no sentido positivo da tensão de polarização de grade não significará um aumento na corrente de placa. A válvula está saturada.

Os limites de operação da válvula triodo (ponto de corte e de saturação), bem como das demais válvulas, varia conforme o tipo. Por exemplo, o duplo triodo ECC82 entra em corte com $E_b=240V$ e $E_c=-18V$, enquanto a ECC83 entra em corte com $E_b=240V$ e $E_c=-3,5V$.

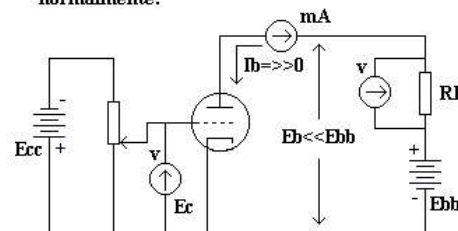
Nesta análise preliminar, mantivemos a tensão de placa E_b fixa, variando a tensão de polarização da grade de controle. Observamos que para cada variação da tensão de grade E_c corresponde uma variação na corrente de placa I_b . A esta altura podemos perguntar: quando a corrente de placa I_b varia o que acontece com a tensão de placa E_b ? Para que esta questão possa ser avaliada é necessário modificar os circuitos mostrados na figura 6, inserindo um resistor em série com a placa e, em paralelo com este, um voltímetro. Este resistor é denominado resistor, ou resistência, de carga de placa. Não confundir com "resistência de placa" (r_p), que é um parâmetro das válvulas triodo e pêntodo e será abordado em breve. A figura 7 ilustra o que acontece com E_b e I_b , em termos de corrente contínua, quando variamos a tensão de polarização da grade de controle E_c obtida através de uma fonte.



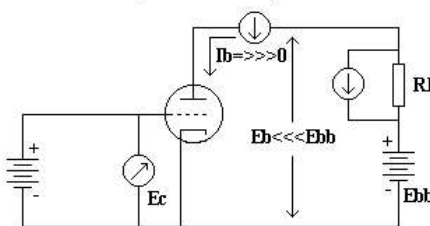
(A) Grade fortemente negativa: $I_b=0$, e nenhuma queda de tensão em RL. A tensão de placa E_b é igual a E_{bb} . O triodo está no corte.



(B) Grade medianamente negativa: $I_b \Rightarrow 0$ e alguma queda de tensão sobre RL. A tensão de placa E_b é inferior a E_{bb} . O triodo conduz normalmente.



(C) Grade próxima de zero: $I_b \Rightarrow \gg 0$ e queda de tensão sobre RL grande. A tensão de placa E_b é bastante inferior a E_{bb} . Triodo perto da saturação.



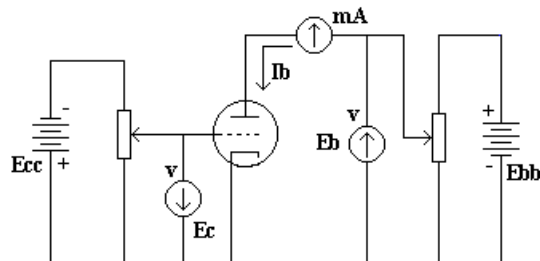
(D) Grade positiva: $I_b \Rightarrow \gg \gg 0$. A queda de tensão sobre RL é quase igual a E_{bb} . O triodo está saturado.

Figura 7

Os desenhos contidos na figura 7 são auto-explicativos. Assim, podemos tirar outras conclusões do que foi exposto até aqui. Os circuitos mostrados na figura 7 se prestam para levantar experimentalmente as curvas características do tríodo promovendo apenas uma modificação, que é colocar um reostato em paralelo com E_{bb} de modo ser possível variar E_b . Vimos que existe um forte inter-relacionamento entre a tensão de polarização de grade E_c e a corrente de placa I_b e tensão de placa E_b . Assim, podemos construir um conjunto de curvas características para demonstrar a variação da corrente de placa I_b em função da variação da tensão de polarização de grade E_c ou tensão de placa E_b . Na verdade, as curvas características são de duas categorias:

- 1) curvas característica de placa e
- 2) curvas características de transferência.

Uma família de curvas características de placa da válvula ECC83 estão representadas na figura 8, que mostra a relação entre corrente de placa I_b e tensão de placa E_b com a tensão de polarização de uma grade E_c constante.



Curvas características de placa duplo-tríodo ECC83

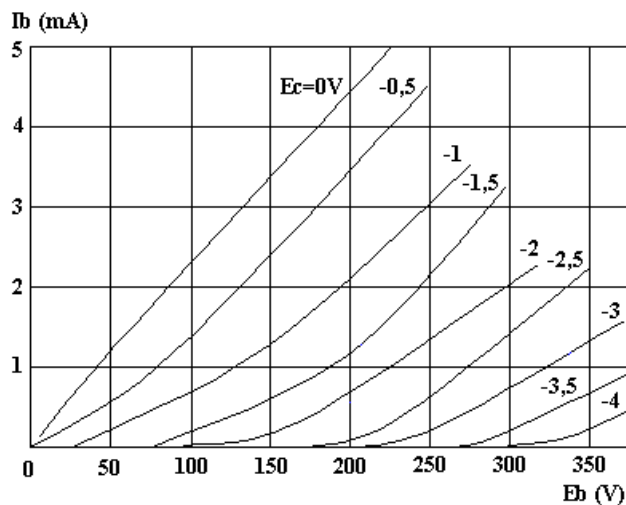
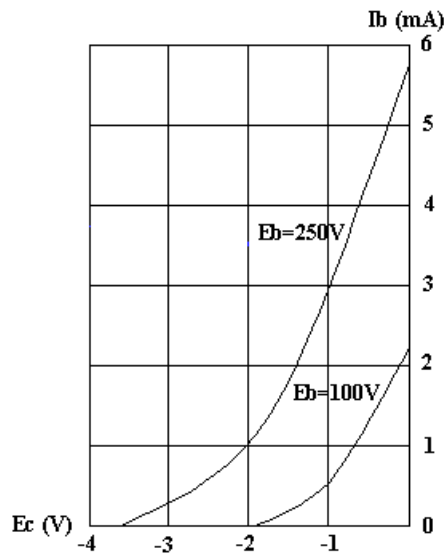


Figura 8

A figura 9, por outro lado, mostra a relação entre corrente de placa I_b e tensão de grade E_c para um valor constante de E_b da mesma válvula. Visto que estas curvas mostram o efeito que as variações de tensão no circuito de grade provocam no circuito de placa são elas denominadas características de transferência ou mútua.



Curvas características de transferência duplo-tríodo ECC83

Figura 9

É muito importante ressaltar que estas famílias de curvas características representam as características "médias" de um determinado tipo de válvula. Como as válvulas são dispositivos extremamente delicados, surgem imperfeições em alguns dos exemplares produzidos. Não obstante, as famílias de curvas características são úteis e suficientemente precisas para se determinar graficamente o ponto de trabalho, a tensão de polarização de grade e as demais características de operação da válvula.

Pêntodo

As modificações na estrutura dos eletrodos do tétrodo para formar o tétrodo foram para encorajar a formação de uma carga espacial entre a grade de blindagem e o ânodo. Esta carga espacial evitou que os elétrons secundários originários do ânodo alcançassem a grade de blindagem. O mesmo efeito pode ser obtido inserindo-se uma grade mantida no ou próximo ao potencial do cátodo entre a grade de blindagem e o ânodo. Como a função desta terceira grade é suprimir a emissão de elétrons secundários, ela é chamada grade supressora. Ela é enrolada com um passo maior do que a grade de controle e a grade de blindagem. O símbolo de um pêntodo é mostrado na figura 10 (a); em virtude de a grade supressora ser normalmente operada no potencial do cátodo, ela é às vezes conectada internamente ao cátodo, conforme mostrado na figura 10 (b).

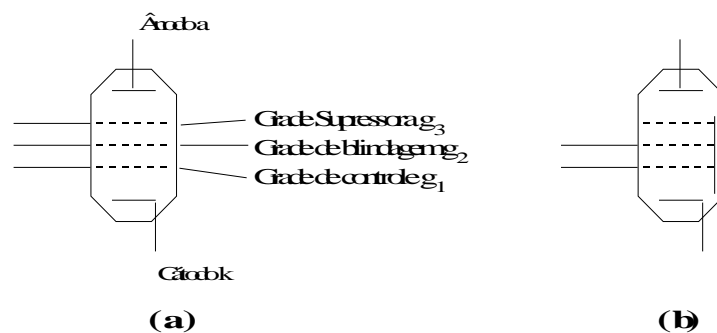


Figura 10

É uma estrutura de eletrodos que consiste de um cátodo, grade de controle, grade de blindagem, grade supressora. A estrutura dos elétrons é montada entre dois discos de mica, o superior e o inferior, adaptada diretamente aos pinos da válvula.

A válvula usa um cátodo de aquecimento indireto. O filamento é formado por um fio de volfrâmio revestido de óxido de alumínio (alumina) para isolá-lo eletricamente do cátodo. O próprio cátodo é um cilindro de níquel revestido no lado externo com material emissivo, uma mistura em partes iguais de óxido de bário e óxido de estrôncio. A função de trabalho deste cátodo revestido de óxido é 1,0 eV e a eficiência de poder emissivo expressa como a corrente de emissão eletrônica com potência de

filamento é tipicamente 800mA/W. A temperatura de operação do cátodo é aproximadamente 700° C.

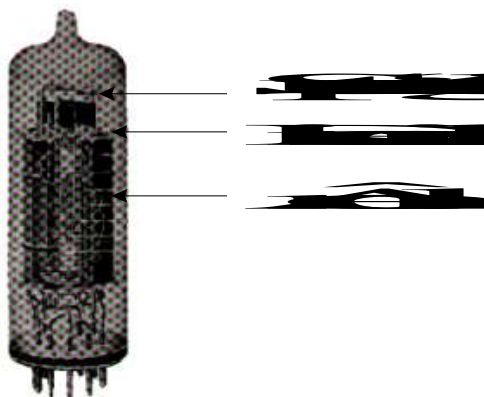


Figura 11 - Construção de um pênodo moderno

O cátodo de aquecimento indireto é usado como fontes de filamento de c.a. Ele tem vantagem de o cátodo ficar eletricamente isolado do filamento e poder ser mantido num potencial diferente do filamento. O outro tipo de cátodo, o cátodo aquecido diretamente, tem o revestimento emissivo sobre o filamento e de aquecimento e é usado com fontes de filamento de c.c. Este tipo tem a desvantagem de o potencial do cátodo na válvula ser sempre o da fonte de filamento e de o potencial ir variar ao longo do comprimento do cátodo.

O cátodo que contém o filamento é localizado num orifício no disco de mica inferior. As grades de controle e de blindagem, que são de seção transversal aproximadamente retangular, são formadas por filamento de fio fino em torno das duas barras de suporte afastadas da distância requerida. O fio é enrolado num pequeno passo e é preso em cada volta ao redor das barras de suporte. As grades são feitas em comprimentos longos e, depois do enrolamento, são cortadas com o comprimento requerido para a válvula. As extremidades das barras de suporte das grades completadas são inseridas em orifícios no disco de mica inferior para localizá-los corretamente em relação ao cátodo. A grade supressora é enrolada com um passo maior em torno de suas barras de suporte, e estas são localizadas em orifícios no disco de mica inferior. Finalmente, o ânodo, que é um cilindro de níquel, é colocado sobre as grades e posicionando por alças que se adaptam em fendas na mica. O conjunto dos elétrons é completado adaptando-se o disco de mica superior. Fendas e orifícios de localização para as barras de suporte e alças de ânodo são fornecidos, e assim a estrutura completa dos eletrodos é fixada rigidamente entre os dois discos de mica para manter o espaçamento correto dos eletrodos.

A placa-base de vidro da válvula contém vedações de vidro para metas em que os pinos da válvulas são ajustados. A estrutura dos elétrons é mostrada diretamente sobre os pinos da válvula soltando-se as barras de suporte que passam pelo disco de mica inferior até aos pinos apropriados. Portanto, os suportes mecânicos da estrutura dos eletrodos são combinados com ligações elétricas. As extremidades do fio do filamento são conectadas aos pinos apropriados.

A estrutura dos eletrodos montada a base são ajustadas num cilindro de vidro que formará o invólucro da válvula. O cilindro é adaptado a um tubo de diâmetro menor que forma a haste de bombeamento. Uma vedação é feita, entre o cilindro e a base fundindo-se o vidro. O cilindro é então esvaziado por uma bomba de vácuo e a haste de bombeamento é lacrada aquecendo-se vidro próximo à válvula até que ele se derreta para formar a vedação. O resto da haste é retirado, deixando a "pip" características no topo da válvula mostrado na figura 11.

Depois de a válvula ter sido evacuada, ela sofre a ação de "getter" para remover qualquer gás residual. O "getter" é uma porção de magnésio ou bário colocada sobre o suporte do "getter" durante a montagem da válvula. O "getter" é ignizado e evapora sobre a superfície interna do vidro, absorvendo no processo a maior parte dos átomos do gás residual para aprimorar o vácuo no interior da válvula. Tomam-se precauções no posicionamento do "getter" para assegurar que o mínimo possível alcance a estrutura dos eletrodos para evitar o risco de curto-circuitos.

A faixa de tensões aplicadas ao ânodo de uma válvula típica de processamento de sinais está entre 100 V e 250 V. A corrente de ânodo está entre 5 mA e 50 mA para aplicações de pequeno sinal, parem na ordem de 500 mA para válvulas de saída. Correntes mais altas podem ser drenadas das válvulas retificadoras. A tensão de filamento é padronizada para as válvulas que operam em paralelo de uma fonte de filamento separada em 6,3 V. Nas aplicações onde os filamentos das válvulas são ligados em série com a fonte da rede principal, a tensão de filamento pode ser mais altas, por exemplo, até 20 V. A corrente de filamento está tipicamente entre 100 mA e 300 mA.

Quando o pênodo é usado como um amplificador de pequenos sinais, as variações na tensão da grade de controle causadas pelo sinal aplicado devem produzir maior variação possível na corrente de ânodo. O efeito da tensão negativa da grade sobre os elétrons que fluem entre os fios da grade é

muito marcante.

TÉTROD

O desempenho de um tríodo é limitado pelas capacitâncias intereletródicas. Foi por esta razão que uma segunda grade, a grade de blindagem, foi inserida entre a grade de controle e o ânodo, e assim formou-se o tétrodo. A grade de blindagem reduz a capacitância grade para ânodo de cerca de 5 pF (típicos de um tríodo da época) para 0,01 pF. (A capacitância de grade para ânodo de um tríodo moderno é tipicamente 1,5 pF.) O símbolo de circuito de um tétrodo é mostrado na figura 12

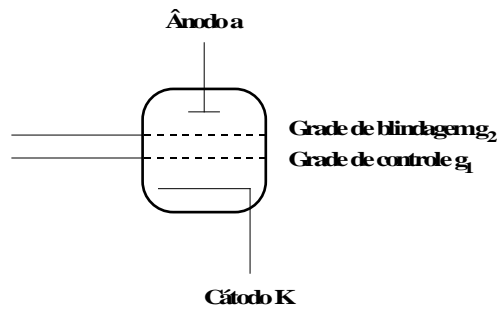


Figura 12

Uma seção transversal esquemática de um tétrodo é mostrada na figura 13. Em virtude do efeito de blindagem das duas grades, a tensão de ânodo tem pouco efeito sobre a emissão de elétrons do cátodo. A grade de controle é mantida em um baixo potencial negativo, por exemplo, até -10 V, que é variado pelo sinal aplicado para controlar a corrente de ânodo. A grade de blindagem é mantida em um potencial positivo constante mais alto, ou seja, +80 V, para acelerar os elétrons em direção ao ânodo.

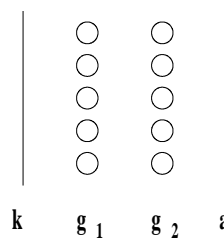


Figura 13

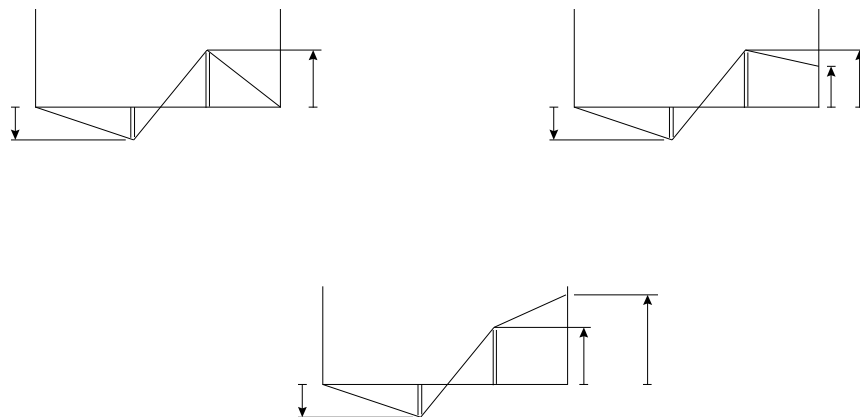


Figura 14

A distribuição de potencial dentro do tétrodo é mostrada na figura 14. Se a tensão de ânodo for zero(a), os elétrons provenientes do cátodo fluirão para a grade de blindagem. Se a tensão de ânodo for aumentada mas for ainda mais baixa que a tensão de grade de blindagem (b), a corrente de ânodo fluirá e a corrente de grade de blindagem será reduzida. Se a tensão de ânodo for aumentada ainda mais de modo que exceda a tensão de grade de blindagem (c), a corrente de ânodo aumentará ainda mais enquanto a corrente da grade de blindagem será ainda mais reduzida. Esta operação idealizada do tétrodo está representada pelas curvas de tensão/corrente da figura 15.

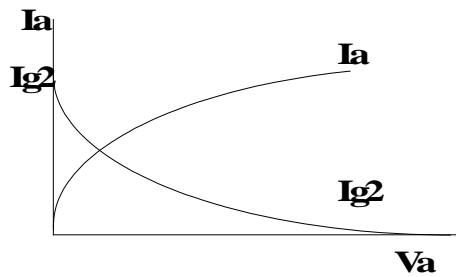


Figura 15

A operação de tétrodo que acabamos de descrever é "ideal" porque despreza o efeito de emissão secundária. Em qualquer válvula, quando a tensão de ânodo está em seu valor de operação normal, os elétrons que alcançam o ânodo terão sido acelerados para adquirir energia suficiente para libertar os elétrons secundário pelo impacto. A emissão secundária ocorre em um tríodo, mas os elétrons secundários são repelidos pela grade negativa e retornam ao ânodo. Em um tétrodo, no entanto, a grade de blindagem positiva atrai os elétrons para aumentar a corrente da grade de blindagem. A emissão secundária também causa uma queda na corrente de ânodo. Portanto, quando a tensão anódica for aumentada a partir de zero, inicialmente haverá um aumento na corrente de ânodo e uma queda na corrente de grade de blindagem. Quando a tensão de ânodo for suficientemente positiva para acelerar os elétrons o bastante para causar emissão secundária, a corrente de ânodo começará a cair e a corrente de grade de blindagem começará a crescer novamente. Quando a tensão de ânodo for aumentada para tornar-se comparável à tensão de grade de blindagem, os elétrons secundários emitidos serão atraídos de volta ao ânodo ao invés de encaminharem a grade de blindagem.

Há uma diferença de energia entre os elétrons primários oriundos do cátodo e os elétrons secundários produzidos pelo impacto com o ânodo. Se uma "barreira de potencial" for induzida pela grade de blindagem e o ânodo, os elétrons primários poderão passar em virtude de sua energia mais alta, enquanto os elétrons secundários não poderão e, portanto, retornarão ao ânodo. Uma tal barreira de potencial pode ser produzida aumentando-se o espaçamento entre a grade de blindagem e o ânodo e concentrando-se o fluxo de elétrons originários do cátodo, de modo que é formada uma carga espacial. Este é o princípio de operação do tétrodo de feixe.

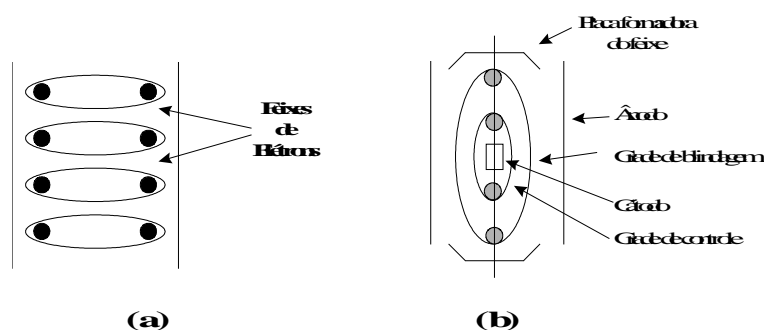


Figura 16

Uma seção transversal esquemática vertical do tétrodo de feixe é mostrada em (a) da figura 16. A grade de controle e a grade de blindagem estejam na sombra dos fios de grade de controle. Os feixes de elétrons resultantes são mostrados em (a). Além disso, duas placas "formadores do feixe" são incluídas na estrutura dos eletrodos, conforme mostrado na seção transversal horizontal de (b). Em virtude do espaçamento aumentado da grade de blindagem para o ânodo, há um ponto onde o efeito dos potenciais positivos do ânodo e da grade de blindagem é mais fraco. Aqui pode ocorrer uma concentração de elétrons, e assim fica formada a carga espacial requerida.